

Denzel Ismael Olvera
Juárez

Control dimensional de componentes de soporte de suspensión y su impacto en
el proceso de ensamble por conformado de metales integración en el índice de
2020



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Control dimensional de componentes de soporte de
suspensión y su impacto en el proceso de ensamble por
conformado de metales

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en
Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta
Denzel Ismael Olvera Juárez



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Calidad y Productividad

Control dimensional de componentes de soporte de suspensión y
su impacto en el proceso de ensamble por conformado de
metales

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestra en Ingeniería de Calidad y Productividad

Presenta

Denzel Ismael Olvera Juárez

Dirigido por

Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla

Dr. Eric Leonardo Huerta Manzanilla
Presidente

M. I. Javier García Pérez
Secretario

M. I. Guillermo Hiyane Nashiro
Vocal

M. I. José Agustín Martínez Rodríguez

Suplente

M. I. Arturo Escoto García
Suplente

Centro Universitario Querétaro, Qro.
Abril de 2020

DEDICATORIAS

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, muchos de mis logros se los debo a ustedes, incluido este trabajo. Ustedes me motivaron constantemente para alcanzar mis metas.

A mi familia, abue Eugenio, mi mentor. En mi búsqueda de entender la vida, siempre has sido un faro guía y un apoyo incondicional.

A Elizabeth, me comprendes y me apoyas en mis momentos más oscuros, mientras todo el mundo está solo, yo te tengo a ti.

Este logro no sería posible gracias a todos ustedes, les agradezco infinitamente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco mucho la ayuda de mis maestros y compañeros por permitirme aprender más de la vida a su lado, en conjunto con todos los copiosos conocimientos que me han otorgado.

Agradezco al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	4
ÍNDICE DE CUADROS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ABREVIATURAS Y SIGLAS.....	10
I. INTRODUCCIÓN.....	13
I.1 METAL DEFECTUOSO.....	13
I.2 ALTURA.....	14
II. ANTECEDENTES	14
II.1 RUIDO, VIBRACIÓN Y DUREZA (NVH).....	14
II.1.1 EL SOPORTE DE SUSPENSIÓN EN EL AUTOMÓVIL.....	15
II.2 FORJADO DE METALES BAJO PRESIÓN.....	16
II.2.1 FORJADO DE ALUMINIO BAJO PRESIÓN.....	16
II.3 ELASTÓMEROS EN LA ABSORCIÓN DE LA VIBRACIÓN	17
II.4 HERRAMIENTAS DE CALIDAD	18
II.4.1 ANÁLISIS DE PARETO.....	18
II.4.2 APLICACIONES DE LAS HERRAMIENTAS DE CALIDAD.....	18
II.5 METODOLOGÍA DMAIC	19
II.5.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	21
II.5.2 DISEÑO ÓPTIMO DE EXPERIMENTOS.....	22
III. HIPÓTESIS.....	23
IV. OBJETIVOS	23
IV.1 OBJETIVO GENERAL.....	23
IV.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	23
V. METODOLOGÍA	24
V.1 PARTICIPANTES.....	25
V.2 MATERIALES Y EQUIPO.....	25

V.3	DEFINIR.....	26
V.4	MEDIR.....	28
V.5	MEJORAR.....	31
V.6	CONTROLAR.....	33
VI.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	34
VI.1	MEDIR.....	34
VI.1.1	ANÁLISIS CON ENFOQUE DE PARETO.....	34
VI.1.2	ANÁLISIS DE HABILIDAD DE PROCESO.....	35
VI.1.3	HALLAZGOS.....	42
VI.2	MEJORAR.....	44
VI.2.1	DISEÑO DE EXPERIMENTOS OPTIMIZADO.....	44
VI.2.2	EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	46
VI.2.3	ANÁLISIS DE VARIANZA.....	46
VI.2.4	EFFECTOS PRINCIPALES.....	48
VI.2.5	COMPARATIVA DE HABILIDAD DE PROCESO.....	51
VI.3	CONTROLAR.....	53
VI.3.1	DISEÑO DE SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	53
VI.3.2	EJECUCIÓN DEL EXPERIMENTO.....	56
VI.3.3	ANÁLISIS DE VARIANZA.....	56
VI.3.4	EFFECTOS PRINCIPALES.....	56
VII.	CONCLUSIONES.....	60
VIII.	REFERENCIAS.....	62
IX.	ANEXOS.....	65

ÍNDICE DE CUADROS

Tabla 1. Estrategia del diseño experimental para la exploración del proceso (factores y sus niveles propuestos).....	32
Tabla 2. Matriz experimental 1 de 4 con 12 corridas de 48.	46
Tabla 3. Resultados de la herramienta AOV del software R studio. Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.....	47
Tabla 4. Resultados de la herramienta AOV del software R. Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.....	48
Tabla 5. Estadísticos para el contraste de los datos en los al inicio y etapa actual del proyecto (agosto 2019 – marzo 2020).....	52
Tabla 6. Matriz para la optimización de proceso con 18 observaciones.....	55
Tabla 7. Resultados de la herramienta AOV del software R studio. Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.....	56
Tabla 8. Matriz para la optimización de proceso con 18 observaciones.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dibujo conceptual del ensamble con cota de altura final señalada.	26
Figura 2. Corte de ensamble final que presenta los tres componentes, Contenedor de aluminio fundido a presión (1), Cubierta plástica (2), Buje inyectado con hule (3). Fuente: Organización del ramo NVH.	27
Figura 3. Ensamble final, se señala la cota a analizar, la cual es la altura final del ensamble. Fuente: Organización del ramo NVH.	28
Figura 4. Análisis de Pareto aplicado a los tipos de defecto del proceso separado por los tres turnos durante un periodo mensual. Elaboración propia.	30
Figura 5. Gráfica de Pareto aplicado al periodo de septiembre de 2019. Elaboración propia.	35
Figura 6. Análisis de habilidad de proceso, muestreo aleatorio durante agosto de 2019.	36
Figura 7. Análisis de habilidad de proceso aplicado al componente Housing en la altura total.	37
Figura 8. Detalle del componente Housing. Escalón interior señalado. Fuente: Organización del ramo NVH.	38
Figura 9. Análisis de habilidad de proceso aplicado al componente Housing en la cota secundaria.	39
Figura 10. Detalle del elemento PC, señalando la segunda cota analizada.	40
Figura 11. Análisis de habilidad de proceso aplicado al componente PC en la altura total.	41

Figura 12. Análisis de habilidad de proceso aplicado al componente PC en la altura total.....	42
Figura 13. Gráfica de ejecución que muestra los subgrupos de las 8 cavidades.....	43
Figura 14. Gráfica de efectos principales para los factores MS y altura de conformado. Variable de respuesta en milímetros.	49
Figura 15. Gráfica de efectos principales para la interacción entre los factores MS y altura de conformado, factor de respuesta en milímetros.	50
Figura 16. Porcentaje de piezas defectuosas por altura producidas durante los meses de duración del proyecto.....	51
Figura 17. Comparativo de las habilidades de proceso (agosto 2019 – marzo 2020).....	53
Figura 17.Gráfica de efectos principales para los factores MS y altura de conformado. Variable de respuesta en milímetros.	57
Figura 18. Comparativo de las habilidades de proceso (marzo 2019 – julio 2020).....	¡Error! Marcador no definido.

ABREVIATURAS Y SIGLAS

- **MS.** Main Spring.
- **PC.** Plastic Cover.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

RESUMEN

El ruido, la vibración y la aspereza están presentes en todas las construcciones automotrices. Debido al aislamiento de la vibración y, en consecuencia, contra la debilidad del ensamblaje final del vehículo, NVH desempeña un papel fundamental principalmente en la industria automotriz. En un ensamblaje por formación de metal, la variación dimensional y la dureza de los componentes son algunas de las causas prominentes de defectos que se encuentran con mayor frecuencia. En esta investigación, el uso del algoritmo de Fedorov para un diseño óptimo se ha conceptualizado para obtener un experimento eficiente, con el fin de reducir el volumen de piezas no conformes en dos tipos de defectos. Los efectos de los parámetros seleccionados en las cuatro variables se han logrado utilizando un enfoque de diseño óptimo. Los resultados indican que las variables y la interacción entre ellas afectan considerablemente la altura final del conjunto.

Palabras clave: Fedorov, diseño óptimo, conformado de metales

ABSTRACT

Noise, vibration, and harshness are present in all automotive constructions. Due to isolation of vibration and in consequence, against weakness of the final vehicle assembly, NVH plays a vital role mainly in the automotive industry. In an assembly by metal forming, dimensional variation and harshness of the components are some of the prominent causes of defects most frequently encountered. In this research, the use of the Fedorov algorithm for optimal design has been conceptualized to obtain an efficient experiment, in order to reduce the scrap volume in two types of defects. The effects of the selected parameters on the four factors have been accomplished using optimal design approach. The results indicate that variables and interaction between them, considerably affect the final height on the assembly.

(Keywords: Fedorov, Optimal design, formed metal)

I. INTRODUCCIÓN

Una importante organización de la región dedicada al ramo de *Noise, vibration and harshness* (NVH) tiene un importante problema de volumen de piezas defectuosas de un ensamble. El ensamble constituye el soporte superior de la suspensión trasera de un vehículo. Este trabajo se centra en lo general, al soporte superior usado en el sistema de suspensión de un vehículo. Este tiene como propósito conectar elásticamente el cuerpo del vehículo al amortiguador (Miyakawa, 1991). El soporte superior mejora la capacidad de aislamiento de vibraciones mientras asegura una mejor estabilidad de manejo del vehículo (Schulz, Application, Data, Examiner, & Culbreth, 2008).

El volumen de producto no conforme mensual es 2% aproximadamente. El 1% causa alarma para operaciones, ya que es inaceptable por parte del cliente. Del volumen total de producto no conforme (2%), el 68 % está asociado a la dimensión de la cota de altura total. Esta cota es afectada por dos modos de fallo, encontrados en los extremos de sus límites de especificación. Estos tipos de defecto son el foco de estudio en este trabajo.

El alcance de este trabajo está propuesto para tener efecto únicamente en la variación de la cota presentada. El defecto *metal defectuoso* (~45% del total de piezas rechazadas) y *altura* (~25%) están relacionados con los extremos de la cota mencionada. Existen cinco tipos más de defectos (~30%) que no son impactados por la variación dimensional de esta pieza. Este trabajo tiene como alcance analizar y experimentar con la naturaleza de los defectos *metal defectuoso* y *altura*, por lo cual se espera repercutir de manera importante a aproximadamente el 70% de piezas defectuosas.

I.1 Metal defectuoso

Cuando la altura final de ensamble es menor a la definida por los límites de especificación aparecen grietas en el formado de aluminio que contiene el buje principal.

I.2 Altura

La altura final del ensamble es mayor a la definida por los límites de especificación por parte del cliente. Por lo tanto, se convierte en piezas no conformes. Esto representa pérdidas debido a que no es posible recuperar material o hacer retrabajo.

II. ANTECEDENTES

Una importante organización de la región dedicada al ramo de *Noise, vibration and harshness* (NVH), presenta un importante problema de volumen de piezas defectuosas en una estación de ensamble. Si bien esta división de la organización tiene como negocio mayoritario la inyección de hule, es de gran importancia resolver el problema en esta estación. Esto atiende a la necesidad de cubrir varios aspectos como mantener la confianza del cliente, adquirir mayor calidad en procesos de ensamble y ahorro en productos de mayor valor monetario.

II.1 Ruido, vibración y dureza (NVH).

Cuando un vehículo viaja a sobre cualquier tipo de camino está expuesto a variaciones de la fuerza impresa en la estructura de este. Las variaciones pueden ser irregularidades del camino, fuerzas de oposición como el viento o caminos ascendentes, fuerzas de aceleración como pendientes, e incluso fuerzas inerciales como una sección en curva, las cuales causan incomodidad al conductor e influyen en la maniobrabilidad (Zhang et al., 2019).

El ruido, vibración y dureza (NVH por sus siglas en inglés) son una de las características más importantes a tomar en cuenta en el desarrollo de un producto automotriz. Un vehículo con un buen comportamiento de NVH usualmente resulta en una buena satisfacción para el cliente. Diferentes modelos de NVH son usados sobre diferentes propósitos para obtener la mayor relación costo-calidad (Sobieszczanski-Sobieski, Kodiyalam, & Yang, 2001).

II.1.1 El soporte de suspensión en el automóvil

Un modelo conceptual de vehículo típico para el análisis de NVH tiene aproximadamente 50,000 grados elásticos de libertad. En la etapa de diseño final se utiliza un modelo de vehículo más detallado para un análisis preciso de NVH. En este modelo detallado del vehículo, el número de grados de libertad es de aproximadamente medio millón (Wang, 2000). Todo este análisis conlleva al diseño de piezas como el soporte superior de la suspensión.

Este soporte superior se interpone entre la carrocería de un vehículo y el amortiguador, para conectar elásticamente la carrocería y el amortiguador. El soporte superior incluye un componente rígido interno, un componente rígido externo, al menos un cuerpo elástico anular interpuesto entre los componentes rígidos interno y externo para conectar elásticamente estos componentes rígidos (Schulz et al., 2008).

En un sistema de suspensión convencional de un automóvil, un soporte superior de forma cilíndrica es colocado entre la estructura del automóvil y el vástago del amortiguador. Este último, a su vez, está conectado mediante un eje para dar soporte a las ruedas del automóvil. Entre otras funciones, el soporte está diseñado para evitar que las vibraciones provenientes de las ruedas del automóvil lleguen a la estructura del automóvil mediante el amortiguador.

Un soporte superior generalmente consiste en tres partes ensambladas por métodos mecánicos. Está constituido por un componente cilíndrico rígido interior que es ensamblado con el vástago del amortiguador, un componente rígido exterior que es ensamblado radialmente con la estructura del automóvil, y un cuerpo elástico interpuesto entre ambos componentes cilíndricos que comunica elásticamente estos componentes (Miyakawa, 1991).

II.2 Forjado de metales bajo presión

La fundición a presión (die casting, DC) es uno de los procesos de fabricación especializada que se utilizan para producir piezas que no pueden ser fabricadas por otro proceso industrial de conformado de metales. En el proceso de fundición a presión de aluminio existe una serie de parámetros que, cuando se determinan y ajustan eficazmente, dan como resultado una calidad mejorada de la pieza de fundición a presión. Esa calidad ésta representada por la mejora en la ductilidad, resistencia, elongación y dureza durante la temperatura de fundición (Dwivedi, Sharma, & Mishra, 2014).

II.2.1 Forjado de aluminio bajo presión

El metal más abundante en la tierra es el aluminio, y, debido a su peso ligero, baja densidad, resistencia a la corrosión, buena conducción eléctrica y conductividad térmica, ha sido ampliamente utilizado en muchos ámbitos alrededor del globo. Este es usado en una variedad de campos como construcción, transporte, energía eléctrica, transporte y dispositivos electrónicos (Li, Yue, He, Zhao, & Wang, 2020). El aluminio sigue siendo el metal más ampliamente procesado en el campo de la fundición a presión para sectores de ingeniería como el espacio aeronáutico, la defensa y las aplicaciones automotrices (Dwivedi et al., 2014).

La fundición a presión de aluminio juega un papel muy importante en la manufactura actual, principalmente en la industria automotriz (Apparao & Birru, 2017). Muchas organizaciones se esfuerzan por buscar materiales ligeros para el desarrollo de piezas de alto rendimiento. Estas piezas tienen propiedades superiores de función y conformado mecánico. Además de mejores propiedades físicas como baja densidad, resistencia moderadamente alta y buena capacidad de moldeo.

II.3 Elastómeros en la absorción de la vibración

En la mayoría de las aplicaciones el caucho que es usado está sujeto a deformaciones que son relativamente pequeñas en comparación con las que es capaz de soportar. En los diferentes productos del ámbito automotriz donde el caucho es usado, tales como ruedas, soportes de motor e incluso cinturones, la deformación es periódica. El uso del caucho en el aislamiento o absorción de las vibraciones trae consigo un número importante de investigaciones sistemáticas, realizadas desde el punto de vista automotriz para el mejor desempeño del caucho en las aplicaciones deseadas. El interés principal en estas investigaciones era conocer y determinar las reglas físicas en las que es determinada la deformación para las piezas de caucho, dependiendo de su tamaño, forma y dureza. Los soportes de caucho son fabricados generalmente de goma inyectada a metal durante la vulcanización. En este tipo de piezas el caucho actúa en tensión, torsión o compresión. Los soportes que han sido diseñados y desarrollados para propósitos dedicados, proponen tener una variedad enorme en diseño geométrico, tamaño, y tipo de esfuerzo (Gehman, 1942).

Una de las propiedades más importantes del caucho para el tipo de soporte analizado en este trabajo es la rigidez estática. Un número importante de técnicas han sido desarrolladas para la medición de la rigidez del caucho,

además de otras propiedades dinámicas. Por ejemplo, el método directo mide la fuerza de reacción en un extremo fijo del soporte y el desplazamiento en el extremo libre (Lin, Farag, & Pan, 2005). Entonces, la rigidez del caucho puede ser determinada desde la función de transferencia entre la fuerza aplicada y el desplazamiento (Nadeau & Chapoux, 2000).

II.4 Herramientas de calidad

II.4.1 Análisis de Pareto

El análisis de Pareto, comúnmente usado solo como una herramienta, es un enfoque que centra su atención en los pocos “vitales” contra los muchos “triviales”. La premisa de este análisis supone que existen pocos artículos de un análisis que representan el 80% de la frecuencia de ocurrencias, mientras que los demás artículos representan solo el 20%, atribuyéndose una menor importancia (Karuppusami & Gandhinathan, 2006).

La gráfica de Pareto, resultado de este análisis, es útil para datos no numéricos, tales como tipo, causa o clasificación. Es comúnmente usada para priorizar la aplicación de recursos, acciones o cambios y en donde aplicarlos. Esta constituida por barras que representan frecuencias de eventos, clasificadas de mayor a menor ocurrencia. Así, la gráfica de Pareto presenta de forma fácil y práctica la separación del 80/20 (Hossen, Ahmad, & Ali, 2017).

II.4.2 Aplicaciones de las herramientas de calidad

Las pérdidas por paros temporales son un problema común en la industria textil. Esto fue demostrado en Bangladesh en 2017. Los paros deben minimizarse para asegurar el máximo nivel de productividad. El análisis de Pareto y el diagrama de casusa- efecto se utilizaron en este trabajo para identificar y evaluar diferentes tipos de paros que se producían en cierta sección de la producción. Después del análisis de Pareto se determinó que las pérdidas por paro de dos tipos constituían el 89.3% del total de pérdidas por paro. Entonces, la aplicación del diagrama de causa – efecto mostró que seis áreas de gran preocupación son las responsables de estas pérdidas (Hossen et al., 2017).

Una causa común para los paros productivos temporales son las fallas en la maquinaria de producción. W. Bialy en 2018 presenta un tipo de fallo analizado en tres máquinas que intervienen en un proceso productivo. Esta tipo de falla resulto en una retraso de la finalización de todos los pedidos de esta empresa. Los análisis realizados (FMEA, diagrama de Ishikawa, gráfica de Pareto), permitieron identificar los defectos que tienen un impacto directo en las averías. Las herramientas y los métodos de gestión de la calidad utilizados en el análisis pueden ayudar a establecer qué tipo de defectos y fallas pueden ocurrir, cuál fue su causa y qué acciones deben tomarse para evitar paradas resultantes de fallas (Biały, 2018).

II.5 Metodología DMAIC

En la industria automotriz existen diferentes técnicas dedicadas a controlar y optimizar procesos. Uno de los enfoques y técnicas más ampliamente utilizados y con resultados de alto beneficio en un lapso corto de tiempo es el enfoque Seis Sigma (Kwak & Anbari, 2006).

Actualmente se opta usar el enfoque seis sigma en trabajos relacionados con el control de procesos, utilizando el método DMAIC. Uno de los enfoques más comunes para esta herramienta es reducir la tasa de rechazo de un producto.

En este caso, generado en una operación de fundición de presión de aluminio en Portugal (Marques, P. and Matthé, 2017). Se empleó un conjunto de herramientas analíticas y conceptuales para caracterizar el problema, tales como el diagrama SIPOC, diagrama de Pareto y la implementación de un diseño de experimentos para la optimización del proceso de *die casting*. Uno de los hallazgos más importantes fue que la alta tasa de rechazo fue causada por factores comunes dentro de la operación de fundición y por la mezcla de piezas rechazadas hechas de diferentes tipos de aleaciones de otros lugares dentro de la planta (Marques, P. and Matthé, 2017).

El método DMAIC es bien recibido por la industria automotriz y algunos la consideran como la mejor estrategia para reducir los defectos y mejorar la calidad. En 2018 fue considerada una solución creativa para mejorar un proceso de ensamble en una empresa automotriz en Rumania mediante el uso del pensamiento estadístico y DMAIC Seis Sigma (Peres & Fogliatto, 2018). Al aplicar este enfoque al proceso los siguientes resultados fueron obtenidos: se mejoró sustancialmente la capacidad del proceso a corto y largo plazo, el Cpk aumentó de 0.96 a 1.72, el nivel Sigma a corto plazo aumentó de 2.9 a 5.2, el nivel sigma a largo plazo aumentó de 1.4 a 3.7, el DPMO se redujo de 81,000 a 108. Todo lo anterior mejoró el proceso conduciendo a la reducción aproximada del 40% del defecto, la elección del proveedor más adecuado condujo a una reducción del defecto del 30% (Pugna, Negrea, & Miclea, 2016).

Otro caso es el de una planta manufacturera de juguetes en Malasia. Esta fábrica no alcanzó su objetivo de scrap para el año 2016-2017. Los datos adicionales sugieren que la fábrica había perdido alrededor de MYR 1–1.5 millones (\$ 245,000 USD–\$ 367,500 USD). En este proyecto para la reducción de scrap se emplearon diferentes herramientas para definir las causas de origen para los diferentes tipos de efectos. Herramientas como el diagrama de Pareto y causa-efecto. El estudio muestra el valor de tomar una estructura y un enfoque teórico y analítico del problema. Esto ayudo a determinar las causas fundamentales de los problemas y sugerir algunas posibles soluciones.

En este caso, los problemas subyacentes estaban relacionados con el seguimiento de los defectos, la planificación, y las soluciones incluían una mejor capacitación, la adopción de técnicas de producción ajustada, como 5S y Kanban (Tan & Tan, 2018).

II.5.1 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos (DOE) es un método sistemático para determinar la relación entre los factores que afectan un proceso y la salida de ese proceso (Salmelin & Parkkonen, 2010).

En otras palabras, se usa para encontrar relaciones de causa y efecto. Esta información es necesaria para administrar las entradas del proceso a fin de optimizar la salida. La comprensión del DOE primero requiere el conocimiento de algunas herramientas estadísticas y conceptos de experimentación. Los términos más utilizados en la metodología DOE incluyen: factores de entrada controlables e incontrolables, respuestas, pruebas de hipótesis, bloqueo, replicación e interacción (Olivero, Nocerino, & Deming, 1995).

El diseño factorial fraccionado, es un diseño factorial que toma una porción específica de corridas experimentales de un diseño experimental completo. Esto permite estudiar un elevado número de factores mediante un número de experimentos menor al que se requeriría en un diseño factorial completo. El diseño factorial fraccional (tipo n^{k-1}) se utiliza para investigar las combinaciones de los factores experimentales (k) y sus respectivos niveles (n). El valor de n^{k-1} en el diseño factorial fraccionario corresponde al número de condiciones experimentales probadas (Olivero et al., 1995).

En este tipo de diseño factorial, las corridas que se utilizan son una porción del total. Los diseños factoriales fraccionados son una buena opción cuando los recursos son limitados y las pruebas son destructivas. Usan menos corridas que los diseños factoriales completos (Jaynes, Wong, & Xu, 2016).

II.5.2 Diseño óptimo de experimentos

El enfoque de diseño óptimo es una manera poderosa para llevar a cabo diseños eficientes a partir de diseños de experimentos completos, además de contar con una fácil adaptación a las situaciones específicas. Esto es ideal cuando se tiene existe conocimiento previo acerca de la posible interacción entre los factores de control y las variables de respuesta esperadas (Goos & Jones, 2011).

El diseño óptimo de experimentos tiene una manera dócil de generar diseños experimentales eficientes. Debido a poder incluir un gran número de factores experimentales con cualquier número de observaciones. Estos factores pueden ser cualitativas o cuantitativas. Al final, con este tipo de ventajas es posible incluir restricciones que se adaptan idealmente al ambiente industrial de manufactura (Goos & Leemans, 2004).

Dentro de este enfoque existen diferentes herramientas específicas, para llevar a cabo la experimentación reducida de los diseños. La función `optFedorov` será usado en este trabajo. Esta función implementada en el software R reporta cinco índices de optimalidad. Los índices no se comportan de manera lineal ni proporcional al número de corridas experimentales. Estos son estimaciones, resultados de un proceso iterativo. El comportamientos los índices dependerán de las simulaciones de la matriz extendida del experimento (Wheeler & Braun, 2019).

III. HIPÓTESIS

El análisis de la variación dimensional de los componentes y el control de la altura del conformado de metal permitirá la estandarización de la altura final del ensamble, mediante un diseño óptimo de experimentos.

IV. OBJETIVOS

IV.1 Objetivo General

Reducir el promedio de 2,400 a 840 piezas rechazadas (~2% -0.7%), estandarizando los factores que afectan directamente a la altura final del ensamble de la pieza mediante el diseño óptimo de experimentos con enfoque DMAIC.

IV.2 Objetivos Particulares

- Generar la propuesta del diseño experimental que contenga la matriz de experimentación optimizada con los niveles de los factores mediante el análisis de Pareto y de habilidad de procesos, en un plazo no mayor a 1 mes.
- Generar el primer reporte de resultados que contenga la identificación de las variables significativas, describiendo sus efectos principales. En un periodo no mayor a 2 meses.
- Generar la propuesta del diseño experimental de optimización que contemple una superficie de respuesta de los factores significantes, en un plazo no mayor a 3.5 meses.
- Comprobar el modelo óptimo de operación de los factores con el cuál el proceso se mantiene robusto ante la variación natural del proceso y sus componentes mediante una corrida de producción para liberación, en un tiempo no mayor a 1 mes.

V. METODOLOGÍA

La metodología de este trabajo fue guiada por el enfoque DMAIC. Se aplicó a partir de la segunda etapa, debido a que la organización estableció previamente la definición del problema y la variable de salida. Se recolectaron y corroboraron datos para poder continuar con las siguientes etapas:

- Análisis de registros defectivos mensuales.
- Análisis de Pareto por defectos.

En este caso, es posible aplicar directamente esta metodología ya que el proceso es estable y con un número de pieza producido constante e indefinidamente. Las secciones principales de la metodología contienen pasos más específicos llevados a cabo con herramientas propias de la ingeniería de calidad. Los pasos por seguir en este trabajo son descritos en la figura 4.

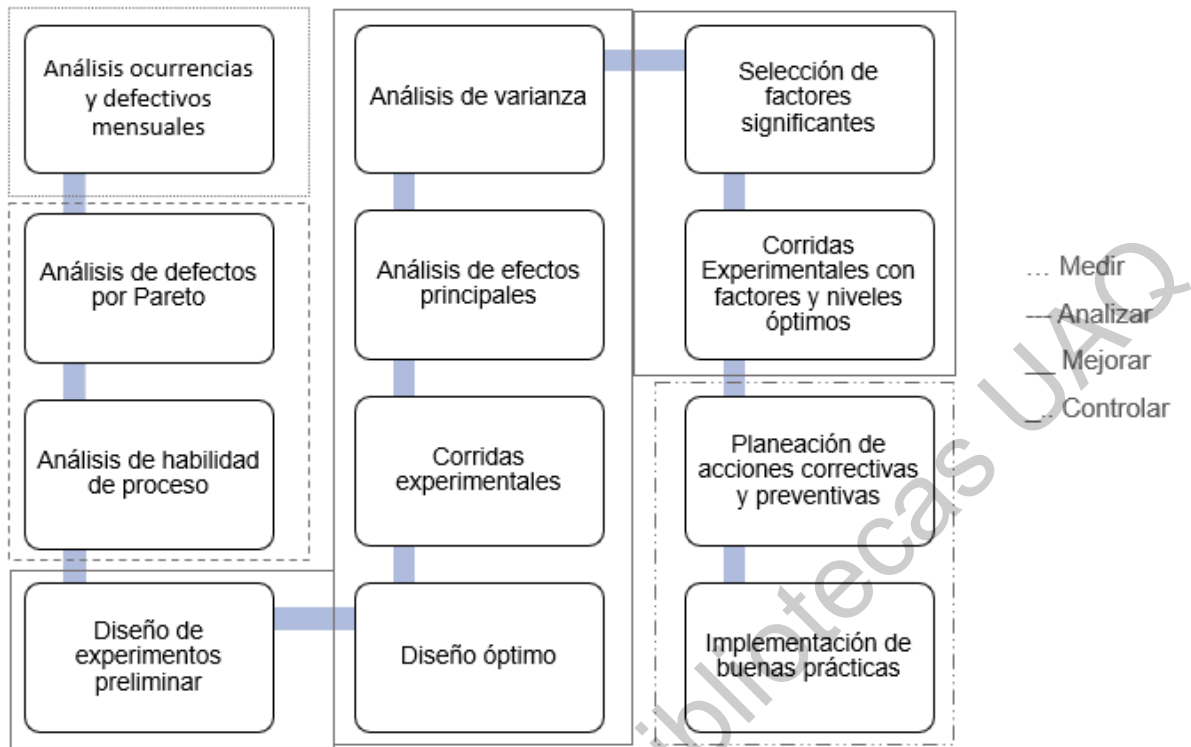


Figura 4. Diagrama de flujo para la metodología propuesta.

V.1 Participantes

- Universidad Autónoma de Querétaro, Posgrado de la Facultad de Ingeniería.
- Organización automotriz del ramo NVH.

V.2 Materiales y equipo

Los participantes de este estudio son estudiantes de los programas de licenciatura de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

- Disponibilidad de celda de ensamble para experimentación.
- Análisis dimensional mediante CMM en el laboratorio de metrología de la organización en cuestión.

- Software R studio 1.2.
- Software Minitab 17.
- 100 piezas de cada componente del ensamble para investigación.

V.3 Definir

La organización del ramo NVH presenta un importante problema de volumen de piezas defectuosas en el ensamble “Top Mount”. El volumen de rechazo mensual es 4% a 2% aproximadamente. Del cual el 68 % está asociado a la dimensión de una cota. El límite establecido por la organización es 1% anual.

Esta cota es afectada por dos modos de fallo, encontrados en los extremos de sus límites de especificación.

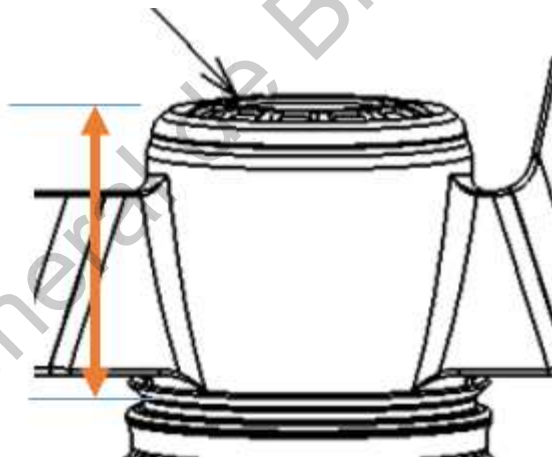


Figura 1. Dibujo conceptual del ensamble con cota de altura final señalada.
Fuente derivada de la intranet (no accesible públicamente) de Organización del ramo NVH

El ensamble por analizar juega un papel importante en el aislamiento de ruido, vibración y dureza, para el automóvil. Este ensamble se encuentra en la parte superior del amortiguador, en la parte trasera de la suspensión del

vehículo, por lo tanto, el producto de este proceso es impacta directamente la comodidad y desempeño del vehículo. El ensamble es ejecutado en una célula automatizada, donde se lleva a cabo el ensamble de componentes de inyección plástica y aluminio por fundición a presión, mediante el conformado de metales, en este caso, crimpado.

Esta célula automatizada está compuesta por 9 procesos, de los cuales 3 son de alimentación, 1 de formado, 3 de inspección, 1 de descarte por defectos y 1 de salida. El proceso de formado y ensamble integra 3 componentes:

1. Un contenedor fabricado en aleación de aluminio por medio de fundición a presión (Housing).
2. Cubierta plástica a base de poliuretano (PC).
3. Soporte principal fabricado por goma inyectada sobre hierro (MS).

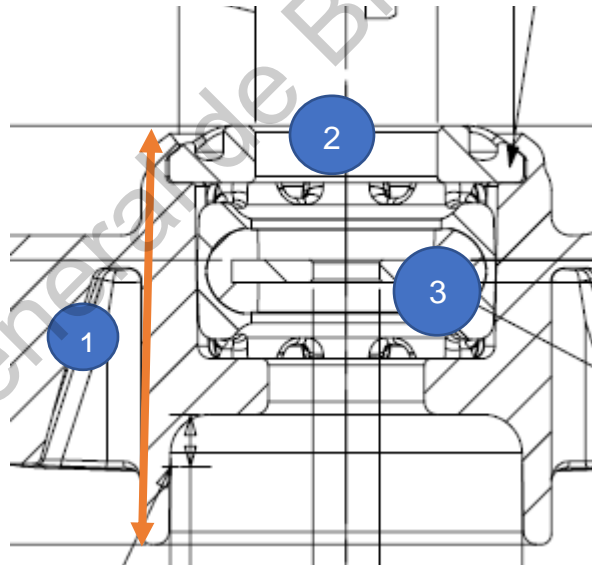


Figura 2. Corte de ensamble final que presenta los tres componentes, Contenedor de aluminio fundido a presión (1), Cubierta plástica (2), Buje inyectado con hule (3). Fuente derivada de la intranet (no accesible públicamente) de Organización del ramo NVH.

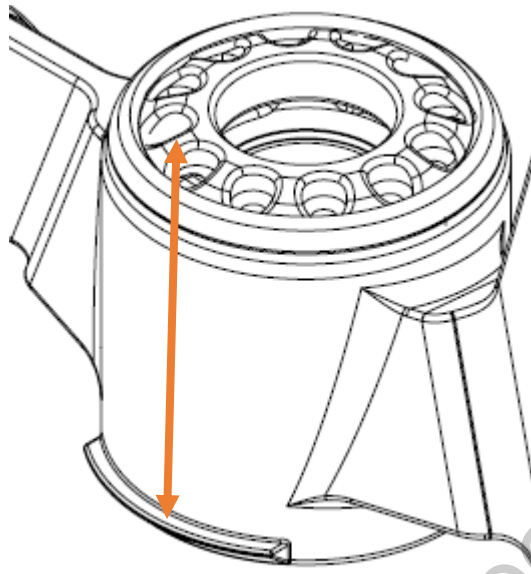


Figura 3. Ensamble final, se señala la cota a analizar, la cual es la altura final del ensamblaje. Fuente derivada de la intranet (no accesible públicamente) de Organización del ramo NVH.

V.4 Medir

Es necesario analizar datos históricos, conocimiento empírico y herramientas estadísticas de análisis del proceso. Con base en lo anterior, se proponen usar las siguientes herramientas:

- **Diagrama de Pareto.** Consiste en un análisis de volumen de desperdicio o piezas no aceptables y los tipos de defectos que las causan. Definir los tipos de defecto que causan el mayor número de piezas de desperdicio permitirá concentrarse en una sola cota del ensamblaje.

- **Habilidad de proceso de ensamble.** El análisis de la habilidad de proceso permitirá entender la naturaleza de la variación y los parámetros de distribución del proceso de ensamble. Es importante verificar que la variación del proceso sea de naturaleza común, y no por causas especiales, asegurando la estabilidad del proceso. La estabilidad deberá ser asegurada para el análisis posterior y el diseño de experimentos exploratorio.
- **Habilidad de proceso de los componentes.** El análisis de la habilidad de proceso de los componentes permitirá observar la influencia que tienen por separado sobre la variación de la altura del ensamble final. Se buscará analizar las diferentes combinaciones en los extremos de la distribución de los componentes. Esto para situaciones específicas en las cuales las sumatorias de las cotas de los componentes excedan los límites de especificación de la altura final.

El uso de las herramientas descritas anteriormente tiene propósitos específicos. El diagrama de Pareto, además de separar los “pocos vitales” de los muchos triviales. Los tipos de defecto son clasificados e indicados en cada turno antes de su acumulación posterior temporal (Turno, día, semana, mes, año). Esto permite la búsqueda de fenómenos posiblemente enlazados con otras variables. Tales como el turno, y por consecuencia los diferentes operadores. Estas diferentes variables son analizadas para determinar su influencia en el proceso en cuestión. La figura 3 muestra un análisis de Pareto con relación a los turnos en un ciclo mensual.

Defectos por turno septiembre 2019

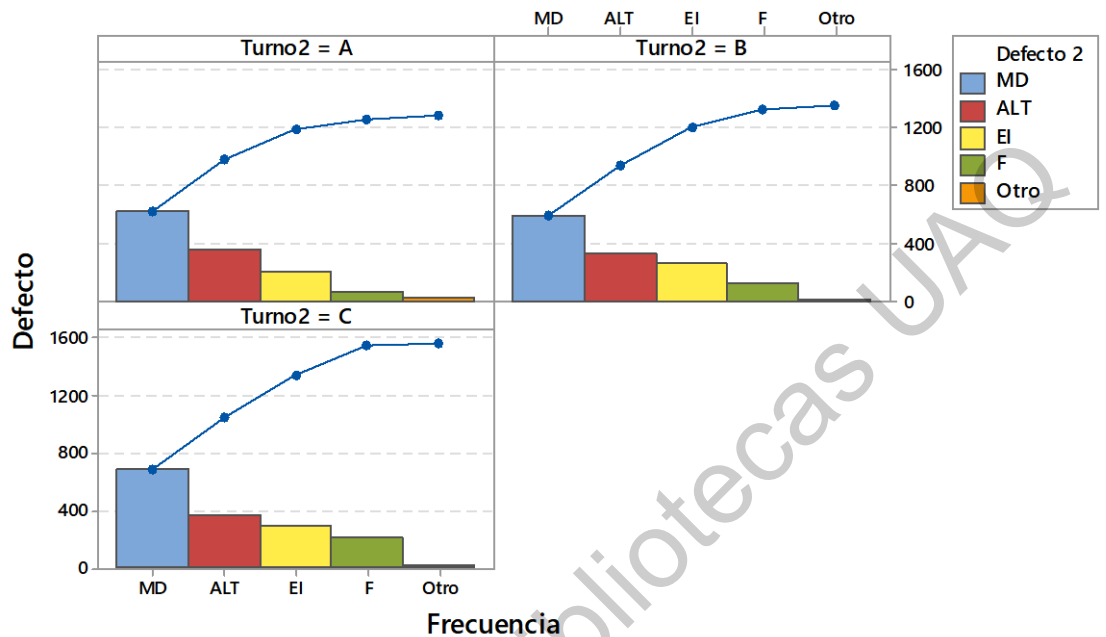


Figura 4. Análisis de Pareto aplicado a los tipos de defecto del proceso separado por los tres turnos durante un periodo mensual.

El análisis de Pareto clasificado por turnos, reafirma la jerarquía de los defectos presentados con anterioridad, sin embargo, no muestra una diferencia significativa de los defectos con respecto a los diferentes turnos, en consecuencia, el personal.

Los análisis de habilidad son dedicados a dos aspectos específicos. El primer aspecto es analizar el estatus del proceso en cuanto a la dimensión indicada en el ensamble, altura final. El segundo es analizar los componentes del ensamble, en cotas que afectan directamente a la altura final del ensamble.

El conjunto de resultados de las herramientas descritas anteriormente tiene como propósito definir los factores y niveles a analizar en un diseño de

experimentos posterior. Este diseño presenta resultados exploratorios que abren una ventana a la naturaleza del proceso de formado.

V.5 Mejorar

En esta etapa se busca determinar los factores que tienen significancia estadística en nuestro proceso, investigar y entender las causas que originan los cambios en estos factores, así como conocer el comportamiento del proceso. Se llevó a cabo el primer diseño de experimentos tomando en cuenta cuatro factores clave para el ensamble. Estos son:

1. Los diferentes nidos en los cuales son inyectados los housing mediante die casting.
2. Los diferentes nidos en los cuales son inyectados los PC.
3. La existencia o no del MS en el ensamble.
4. La altura a la cual está programado el proceso de rolado (Recorrido 2.192mm/2.215mm).

Los dos primeros factores se analizaron dimensionalmente, sin embargo, no es posible ni práctico manipular la entrada con esta magnitud. Por ello se define que los niveles de estos factores sean identificados por el nido en el cual son inyectados. La variable MS se propone en dos niveles, ya que este componente es comprimido dentro del ensamble por el housing y el PC. Los dos niveles propuestos son la presencia o no de este. Estos factores son de tipo categórico a excepción de la altura del rolado, por lo cual se propone programar a dos niveles diferentes para así expresar el factor como categórico. Se contemplan cuatro factores con dos niveles y dos variables con dos niveles. Esto construye un diseño factorial completo de ocho filas por cuatro columnas presentado en la tabla 1.

Tabla 1. Estrategia del diseño experimental para la exploración del proceso (factores y sus niveles propuestos).

Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4
1	1	0	1
2	2	1	0
3	3	0	1
4	4	1	0
5	5	0	1
6	6	1	0
7	7	0	1
8	8	1	0

El diseño factorial completo dará como resultado 256 corridas experimentales, las cuales tendrían que ser replicadas en tres ocasiones para tener fiabilidad en la repetición de los fenómenos por analizar. Esta reproducción de corridas arrojará como resultado un total de 768 corridas necesarias para analizar la mayoría de los posibles eventos dentro del sistema a analizar.

Los recursos necesarios para llevar a cabo la experimentación son, entre otros, tiempo necesario para llevar a cabo la experimentación, personal para alimentar la maquina durante la experimentación, tiempo de uso del laboratorio de metrología para el análisis de resultados, elementos para ensamble (de los cuales al menos el 50% serán piezas no conformes al finalizar la experimentación).

Debido al costo que estos recursos suponen, se pretende usar el enfoque de diseño óptimo para reducir la experimentación a ejecutar. Se propone un

diseño factorial fraccionado. La fracción de corridas a elegir será dada por la herramienta de diseño óptimo de Fedorov, mostrando índices de eficiencia y error de la fracción elegida. La matriz reducida de experimentación que resultará será dividida y filtrada para una ejecución más eficiente en la planta de la organización.

V.6 Controlar

Los resultados del diseño factorial preliminar mostrarán, en primera instancia, la naturaleza del proceso. Al analizar estos resultados se podrá determinar la importancia de los factores elegidos en la variación. En concreto, se eliminarán aquellos factores que no tengan el peso suficiente para desplazar la distribución de los datos de salida. Y, de ser necesario, al no explicar en su mayoría la variación, se añadirán factores nuevos propuestos por personal experimentado en el proceso.

El análisis de resultados, con los factores restantes, presentará una ventana para observar los valores óptimos dentro del rango elegido. Esto nos permitirá proponer los valores ideales para obtener los mejores resultados. Entonces, se propondrá un nuevo diseño de experimentos, que, dependiendo de la naturaleza de los resultados preliminares, contendrá los valores óptimos o no explorados de los factores significativos. Los resultados de este nuevo experimento validarán o no las conclusiones de la experimentación preliminar.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

VI.1 Medir

VI.1.1 Análisis con enfoque de Pareto

Se analizó el volumen de rechazo y sus diferentes tipos de defectos por intervalos mensuales. En este se determinó que aproximadamente el 70% de rechazo es generado por dos tipos de defecto, que tienen origen en el proceso de conformado de metal. Por ello se decidió trabajar sobre el impacto de este conformado sobre la altura del ensamble.

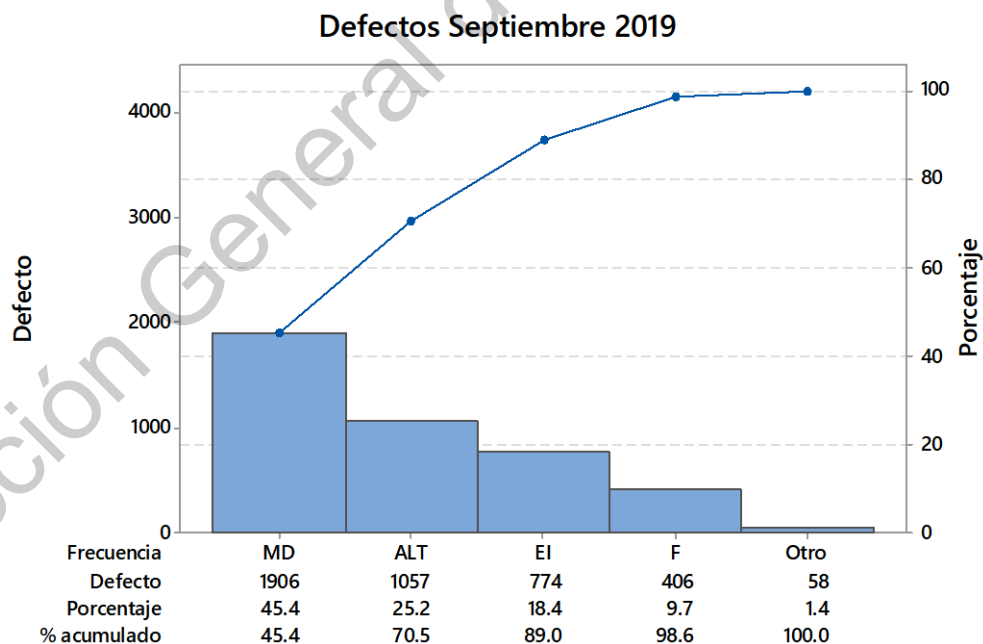


Figura 5. Gráfica de Pareto aplicado al periodo de septiembre de 2019.

El análisis con enfoque de Pareto permitió delimitar el alcance del estudio, debido a que los otros tipos de defecto están relacionados con otras variables y procesos ajenos a la estación de manufactura. Permitted observar cierta inestabilidad en el proceso, por lo cual fue necesario la verificación del estado de la máquina de conformado de metales. Presentó inestabilidad en la repetición de posición horizontal y vertical en el formado. El equipo de mantenimiento dio acciones correctivas a la máquina, regresando al estado original de operación, esto impulsó la estabilidad del proceso para los análisis posteriores. También mostró datos censurados en el registro de defectos diario.

VI.1.2 Análisis de habilidad de proceso

El análisis de habilidad de proceso fue aplicado en muestras aleatorias provistas por la organización, estas muestras pertenecen al mes de agosto de 2019. Estas no tienen ningún tipo de influencia del presente proyecto. Este análisis permite observar el lugar donde se encuentra el proceso con respecto a las especificaciones de diseño, y la naturaleza de este para requerimientos de calidad.

Habilidad de proceso Top Mount

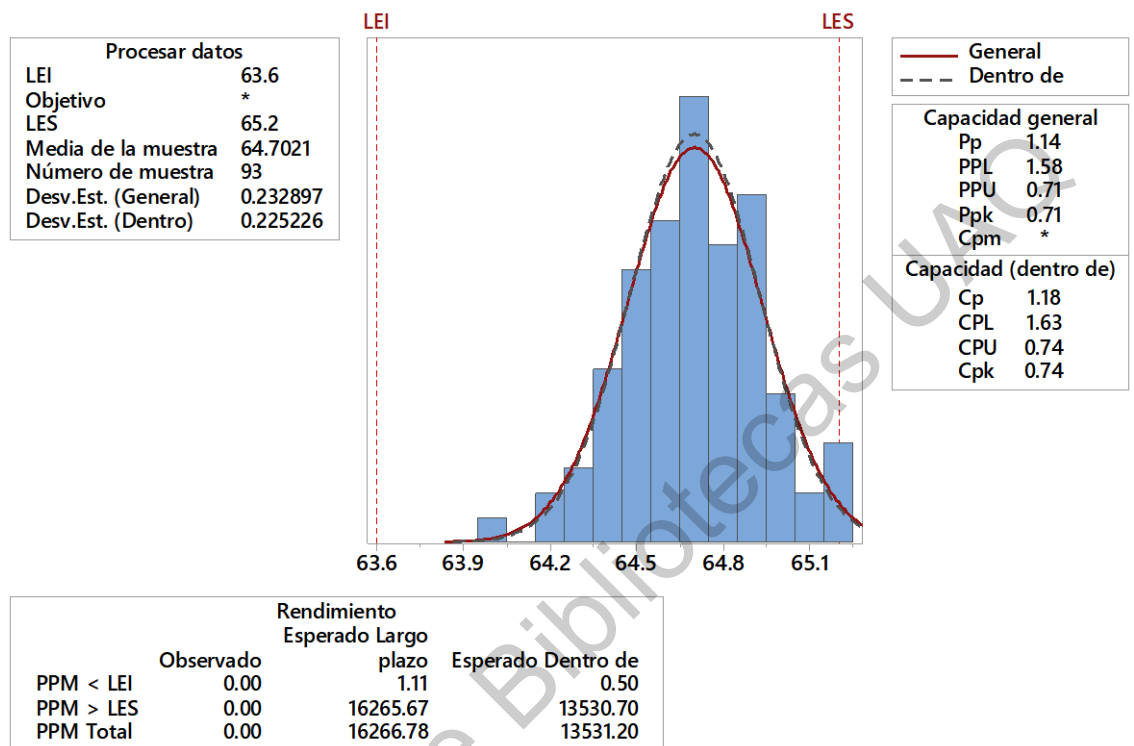


Figura 6. Análisis de habilidad de proceso, muestreo aleatorio durante agosto de 2019.

Se observó que el proceso se encontraba con condiciones por corregir, un porcentaje importante de los datos tenía tendencia hacia el límite superior de especificación. La cota de altura de ensamble es afectada directamente por el ensamble de tres componentes. Debido a esto se analizó la habilidad de proceso de dos de los componentes.

VI.1.2.1 Habilidad de proceso de Housing.

Habilidad de proceso-Altura de Housing

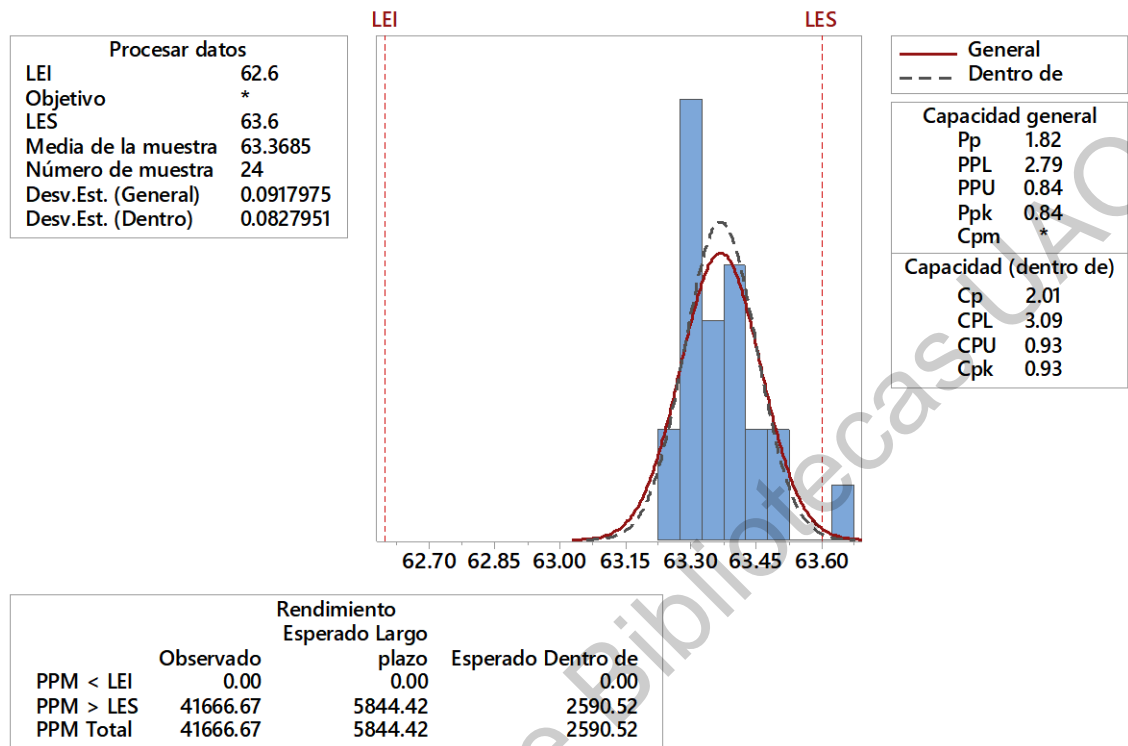


Figura 7. Análisis de habilidad de proceso aplicado al componente Housing en la altura total.

Este análisis presentó en primera instancia algunos puntos fuera de especificación en ambos componentes. En particular el componente Housing presenta tendencia en sus datos hacia el límite de especificación superior, lo que podría afectar directamente a la altura total del ensamble.

En adición también se observó la naturaleza del diseño del Housing. Esto llevó al análisis de una cota secundaria en el mismo componente que afecta directamente a la altura final del ensamble. En la figura 7 se puede observar el detalle de la cota secundaria.

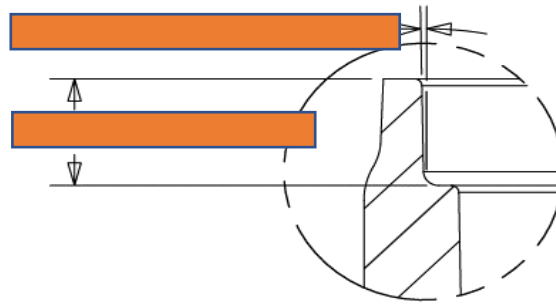


Figura 8. Detalle del componente Housing. Escalón interior señalado. Fuente derivada de la intranet (no accesible públicamente) de Organización del ramo NVH.

Se observó que las diferentes cavidades de die casting presentan diferente variación. Por lo cual se decidió tomar como niveles para el diseño de la experimentación. De igual manera se optó por usar el mismo proceso para el componente PC. Además de entender que la cavidad puede ser controlada como variable categórica y ser analizada, y corregida por el proveedor, no así con la altura como variable continua en la entrada del proceso.

Habilidad de proceso-Altura de escalon Housing

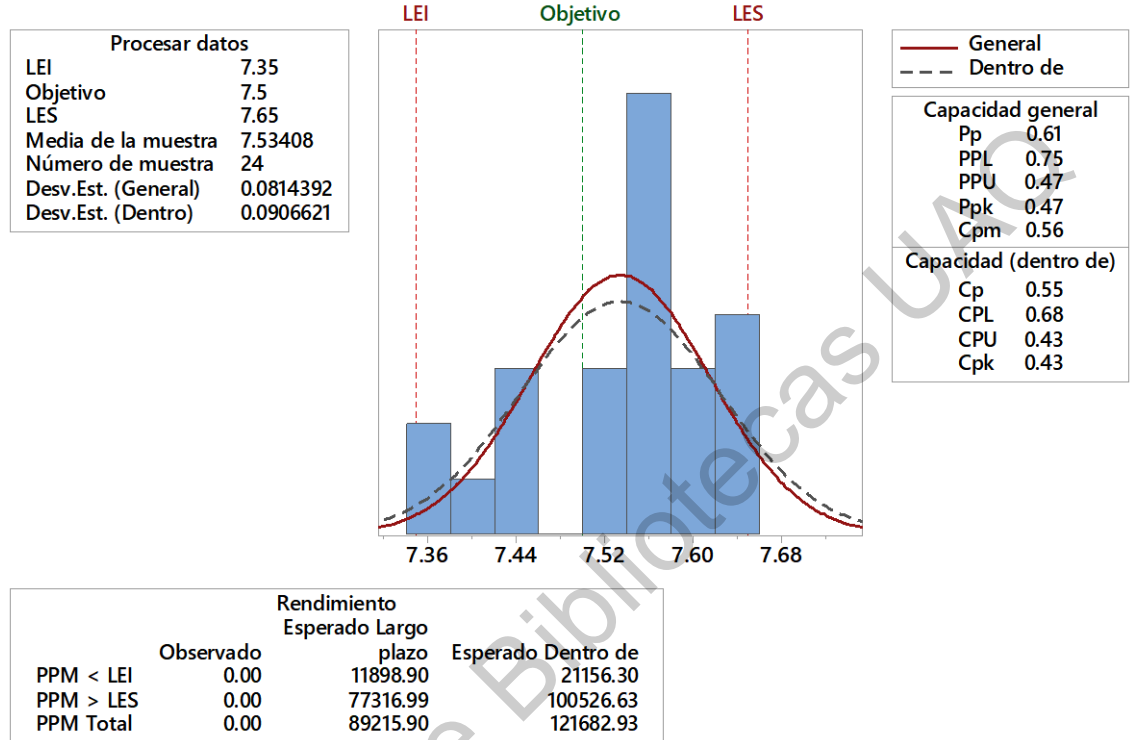


Figura 9. Análisis de habilidad de proceso aplicado al componente Housing en la cota secundaria.

Distribución de datos que sale de los límites de especificación a ambos lados. Se observa un sesgo de valores cercanos al objetivo, dando como resultado dos distribuciones. La forma de la distribución de los datos de esta cota contra la variación de la altura total sugiere una independencia de variación.

VI.1.2.2 Habilidad de proceso de PC

El segundo elemento analizado es el PC, fabricado en polímero rígido. Este tiene la función de mantener al MS aprisionado dentro del Housing con

ayuda del conformado metálico. Este componente ha sido analizado en dos cotas. La figura 9 presenta las dimensiones analizadas.

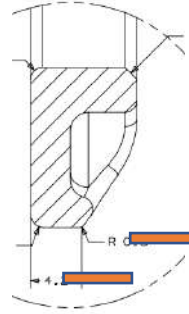


Figura 10. Detalle del elemento PC, señalando la segunda cota analizada. Fuente derivada de la intranet (no accesible públicamente) de Organización del ramo NVH.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

Habilidad de proceso-Altura de Plastic Cover

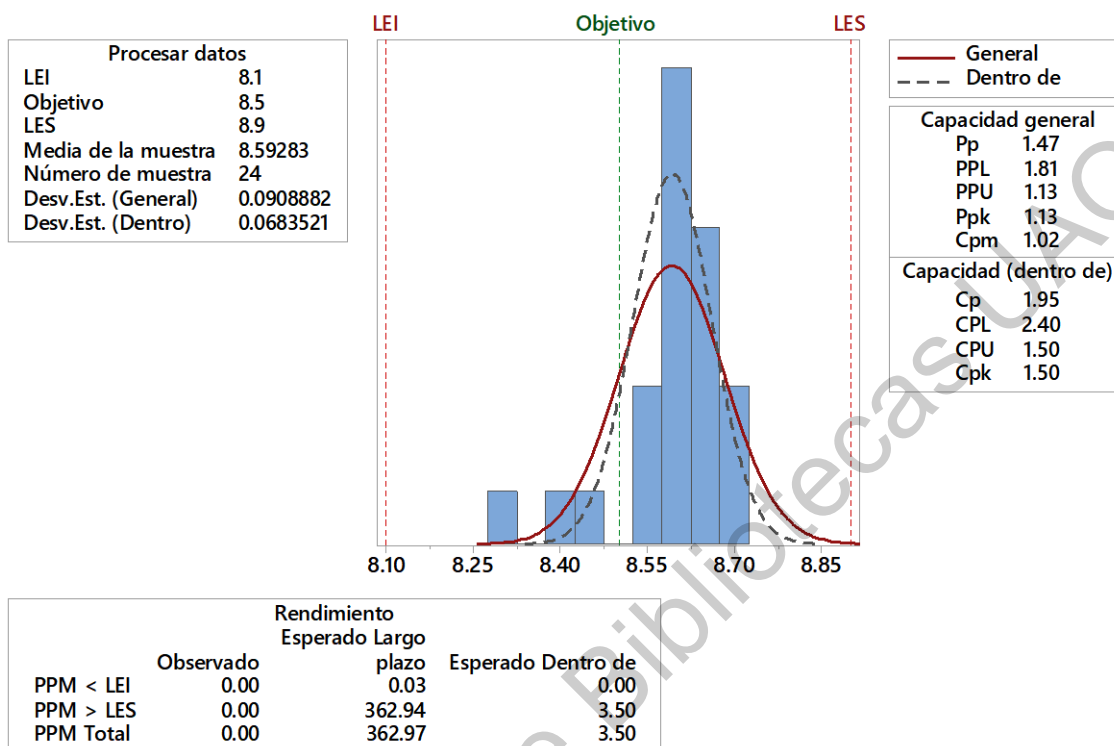


Figura 11. Análisis de habilidad de proceso aplicado al componente PC en la altura total.

Si bien los valores de habilidad a corto plazo son favorables (~4), los valores a largo plazo son menores (aún adecuados ~1.8), esto se debe a la variación entre subgrupos, fallando la prueba 1, esto podría indicar un proceso fuera de control.

Habilidad de proceso-Altura secundaria de Plastic Cover

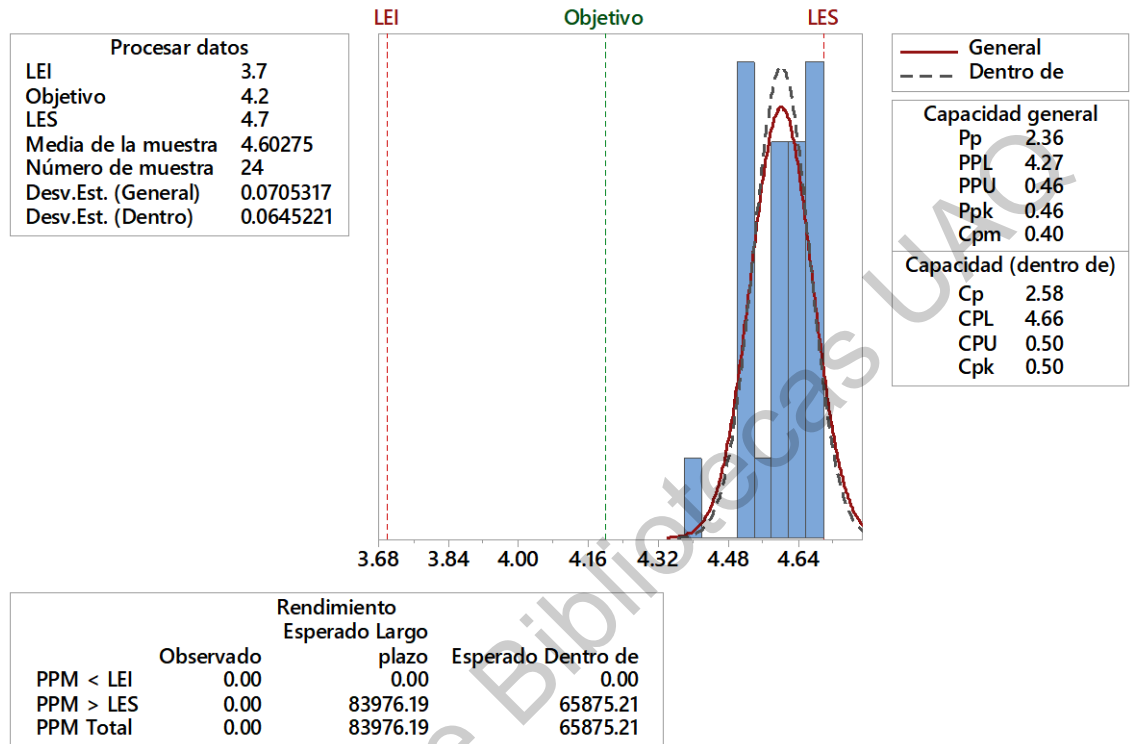


Figura 12. Análisis de habilidad de proceso aplicado al componente PC en la altura total.

Los valores de habilidad a corto plazo y globales son similares indicando probable control del proceso. Sin embargo, la habilidad de cumplir con el objetivo es muy baja, la probabilidad de que los datos puedan encontrarse fuera de especificación es alta. Esto debido a la desviación estándar y la cercanía al límite superior de especificación.

VI.1.3 Hallazgos

- La habilidad de proceso de la altura total del housing es deficiente. Su distribución está situada cerca del límite superior de especificación, pudiendo afectar directamente la altura total del ensamble.
- La variación del escalón interior del housing se muestra independiente de la variación de altura total.
- La habilidad de proceso de la altura total del PC es adecuada, no así la cota secundaria analizada, que es la altura trapezoidal que también se encuentra cercana al límite superior de especificación.

El análisis individual de los componentes rígidos y las cotas que afectan directamente la altura mediante la habilidad de proceso. Además del análisis de los componentes mediante gráficos de control permitió proponer a cada componente como una variable dimensional. Los niveles propuestos son respaldados por las variaciones grupales halladas, debido a que fueron clasificadas por cavidad en la que fueron inyectados estos componentes. Es posible observar en la gráfica de ejecución (figura 13) que cada una de las 8 cavidades existe diferente variación.

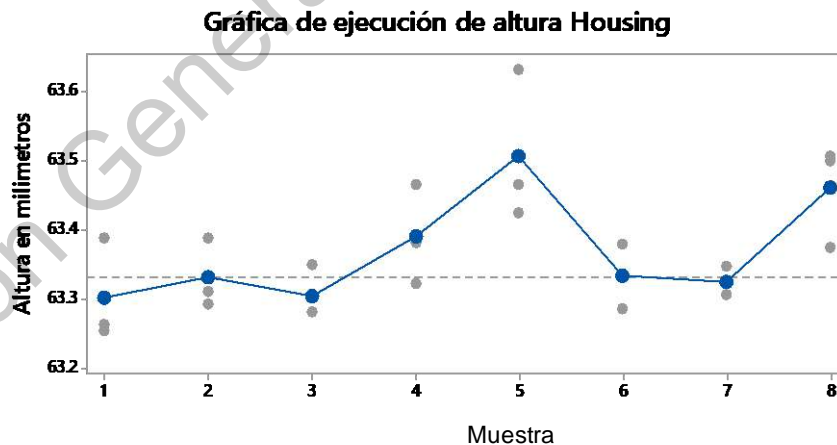


Figura 13. Gráfica de ejecución que muestra los subgrupos de las 8 cavidades.

VI.2 Mejorar

VI.2.1 Diseño de experimentos optimizado

El diseño factorial completo generó 256 corridas experimentales, las cuales tendrían que ser replicadas en tres ocasiones para tener fiabilidad en la repetición de los fenómenos por analizar. Esta reproducción de corridas arrojó como resultado un total de 768 corridas necesarias para analizar la mayor parte de los posibles eventos dentro del sistema a analizar. Los recursos necesarios para llevar a cabo la experimentación son, entre otros, tiempo necesario para llevar a cabo la experimentación, personal para alimentar la maquina durante la experimentación, tiempo de uso del laboratorio de metrología para el análisis de resultados, elementos para ensamble (de los cuales al menos el 50% serían piezas no conformes al finalizar la experimentación). Debido al costo que estos recursos suponen, se pretende usar el enfoque de diseño óptimo para reducir la experimentación a ejecutar. Se propuso un diseño factorial fraccionado. La fracción de corridas a elegir será dada por la herramienta de diseño óptimo de Fedorov, mostrando índices de eficiencia y error de la fracción elegida. La matriz experimental comprende un total de 48 corridas, obteniendo los siguientes indicadores (1) que representan el modelo con un 84% de eficiencia.

\$D [1] 0.1431426

\$A [1] 14.18402

\$Ge [1] 0.846 **(1)**

\$Dea [1] 0.83

Tabla 2. Matriz experimental reducida mediante algoritmo de Fedorov.

No	Obs	Hng	Cvr	MS	H
1	21	n2	p7	no	Alto
2	31	n3	p1	si	Bajo
3	32	n5	p7	si	Bajo
4	66	n4	p6	si	Alto
5	67	n6	p1	no	Alto
6	94	n1	p2	si	Bajo
7	95	n4	p4	si	Alto
8	101	n2	p2	si	Alto
9	103	n8	p8	si	Alto
10	106	n5	p3	no	Alto
11	111	n8	p5	no	Alto
12	142	n3	p3	si	Bajo
13	173	n1	p5	si	Bajo
14	188	n6	p4	no	Bajo
15	194	n7	p6	no	Bajo
16	200	n7	p8	no	Bajo
17	266	n4	p1	no	Alto
18	275	n1	p8	no	Alto
19	292	n5	p8	si	Alto
20	296	n3	p6	no	Bajo
21	348	n2	p5	no	Bajo
22	349	n6	p6	si	Alto
23	360	n2	p4	no	Bajo
24	362	n4	p7	si	Bajo
25	384	n8	p2	no	bajo
26	396	n8	p4	si	bajo
27	400	n7	p5	no	alto
28	418	n6	p3	si	bajo
29	429	n5	p1	no	bajo
30	458	n1	p3	no	alto
31	480	n7	p7	si	bajo
32	483	n3	p2	si	alto
33	524	n6	p5	si	alto
34	528	n2	p6	si	alto
35	554	n1	p6	no	bajo
36	559	n4	p3	no	bajo
37	570	n4	p8	no	bajo
38	639	n3	p4	no	alto
39	650	n7	p3	si	alto
40	655	n8	p1	si	bajo
41	660	n7	p4	si	alto
42	675	n3	p7	no	alto
43	682	n1	p1	si	alto
44	690	n5	p5	si	bajo
45	693	n8	p7	no	alto
46	730	n5	p2	no	alto
47	753	n6	p2	no	bajo
48	763	n2	p8	si	bajo

VI.2.2 Ejecución del experimento

Para llevar a cabo la experimentación de manera eficiente y tomando el menor tiempo operativo necesario se filtran las corridas, por altura y presencia de "MS". Se ejecutó en cuatro fases de experimentación con estos filtros en las tablas 2-5. El propósito de esta experimentación es conocer los efectos principales de los factores elegidos, permitiendo conocer mejor la naturaleza del proceso.

Se llevó a cabo la experimentación prevista, con un total de 48 corridas experimentales. Esta experimentación da como resultado cuatro datos por corrida experimental. Debido a que la pieza a medir constituye un cilindro rectangular, la pieza es medida en su altura desde cuatro lados en el perímetro de la circunferencia. La experimentación dio un total de 192 datos.

Tabla 2. Matriz experimental 1 de 4 con 12 corridas de 48.

Run	Housing	Cover	Spring	Altura	Block
66	n4	p6	si	alto	0.1
95	n4	p4	si	alto	0.1
101	n2	p2	si	alto	0.1
103	n8	p8	si	alto	0.1
292	n5	p8	si	alto	0.2
349	n6	p6	si	alto	0.2
483	n3	p2	si	alto	0.2
524	n6	p5	si	alto	0.3
528	n2	p6	si	alto	0.3
650	n7	p3	si	alto	0.3
660	n7	p4	si	alto	0.3
682	n1	p1	si	alto	0.3

VI.2.3 Análisis de varianza

Posteriormente, mediante un análisis de la varianza se buscan los factores que tienen significancia estadística. Esto permitirá diseñar un experimento de optimización, llevando a los factores significantes a una estandarización.

Habiendo ejecutado la experimentación y obtenidos los resultados de medición por parte del laboratorio de metrología, se realizó el análisis de la varianza considerando las cuatro variables manipuladas durante la experimentación, además de incluir las interacciones dobles y triples de estas.

Tabla 3. Resultados de la herramienta AOV del software R studio. Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

	Df	Sum sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Housing	7	0.723	0.103	1.298	0.26103
PCover	10	0.988	0.099	1.243	0.27624
MSpring	1	5.566	5.566	69.986	1.04E-12***
Height	1	6.473	6.473	81.394	4.88E-14***
Housing:PCover	53	5.436	0.103	1.29	0.14639
Housing:MSpring	4	0.293	0.073	0.921	0.45539
PCover:MSpring	6	0.985	0.164	2.065	0.06576 .
Housing:Height	5	1.244	0.249	3.128	0.01218*
PCover:Height	7	1.813	0.259	3.256	0.00413**
MSpring:Height	1	0.184	0.184	2.309	0.1323
Housing:PCover:MSpring	6	0.513	0.086	1.076	0.38326
Housing:PCover:Height	5	0.365	0.073	0.917	0.47405
Residuals	85	6.76	0.08		

Los resultados de este análisis sugieren los factores MS y Altura de conformado de cuatro tienen significancia estadística en el proceso, esto, al presentar un valor P menor a 0.05. Dejando fuera de observación a la variación aportada por las diferentes cavidades de inyección de los otros dos factores. Tampoco se mostró significancia estadística por parte de ninguna interacción.

Posteriormente se ejecutó un segundo análisis de varianza, se consideró únicamente los dos factores mencionados anteriormente y la interacción entre ambos.

Tabla 4. Resultados de la herramienta AOV del software R. Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

	Df1	Sum Sq1	MeanSq_1	F value1	Pr(>F)_1
MSpring	1	5.832	5.832	74.1	2.94E-15***
High	1	6.416	6.416	81.52	2E-16***
MSpring:High	1	4.297	4.297	54.6	4.69E-12***
Residuals	188	14.797	0.079		

Los datos presentan significancia estadística de los factores MS y Altura de conformado. Cabe resaltar que en este análisis también presenta significancia la interacción entre ambos factores, mostrando un valor P por debajo del 0.05.

VI.2.4 Efectos principales

La gráfica de efectos principales presenta el comportamiento de la altura del ensamble contra la presencia del MS y la altura del conformado del metal.

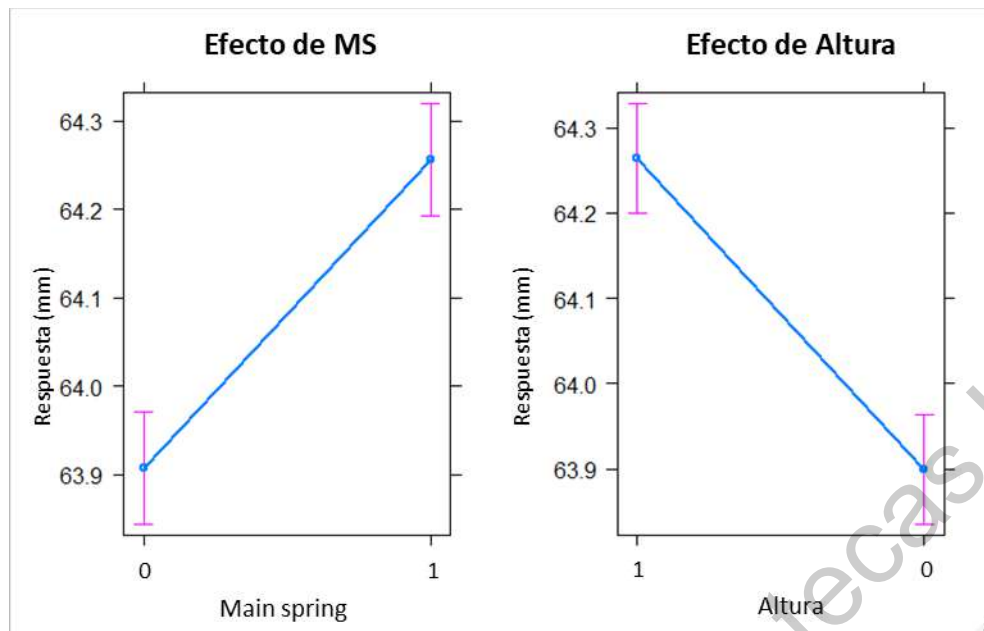


Figura 14. Gráfica de efectos principales para los factores MS y altura de conformado. Variable de respuesta en milímetros.

Debido a este resultado se optó por graficar los resultados principales de la interacción de los factores en la figura 6. Gracias a esta gráfica es más fácil observar la estrecha interacción entre los dos factores a los cuales se les atañe significancia estadística.

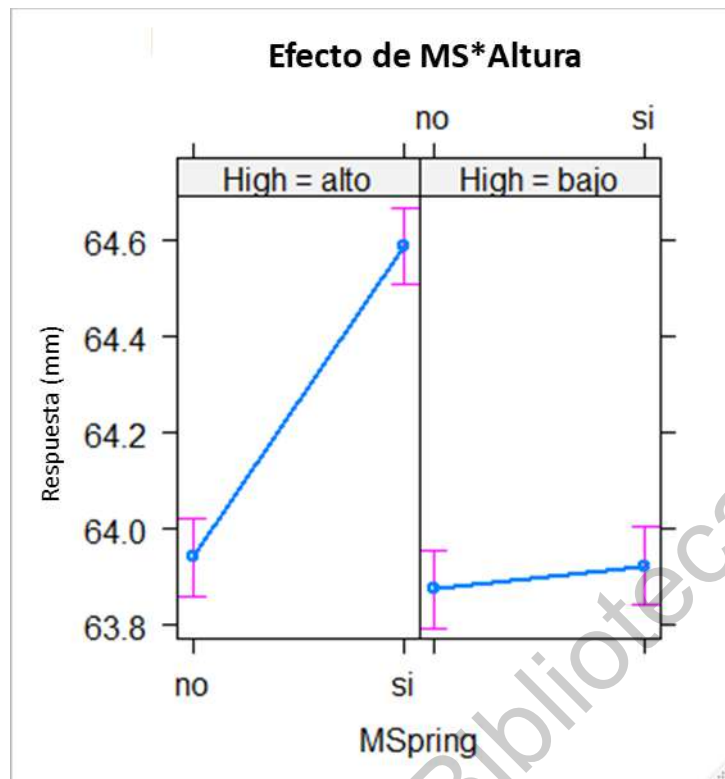


Figura 15. Gráfica de efectos principales para la interacción entre los factores MS y altura de conformado, factor de respuesta en milímetros.

Al ser esta, la etapa de parametrización se propone el uso del diseño óptimo con el algoritmo de Fedorov, de manera diferente a Apparao en 2017, donde se sigue un arreglo ortogonal de Taguchi, donde el diseño experimental está orientado a observar el comportamiento no lineal de las características del die casting (Apparao & Birru, 2017). Este enfoque se orienta a una mayor eficacia y ahorro en los recursos al reducir el número de corridas experimentales. Sin embargo, en un trabajo posterior, puede ser considerado un diseño completo factorial, como superficie de respuesta u ortogonal para analizar el comportamiento de los factores con significancia estadística.

VI.2.5 Comparativa de habilidad de proceso

Al final de la etapa de parametrización, se optó por aplicar los mejores parámetros encontrados. Estos son la altura de conformado de metales “baja” (2.215mm) y por estructura del ensamble se mantiene la presencia del componente “MS”, esto tiene efecto para el mes de marzo, en el cual se implementaron análisis para determinar el impacto de esta etapa en el proceso.

Se analizaron únicamente los volúmenes de defectos de altura comparados contra los volúmenes totales de producción durante los meses de implementación del proyecto. El porcentaje mensual de defectos por altura es presentado en la figura 9.

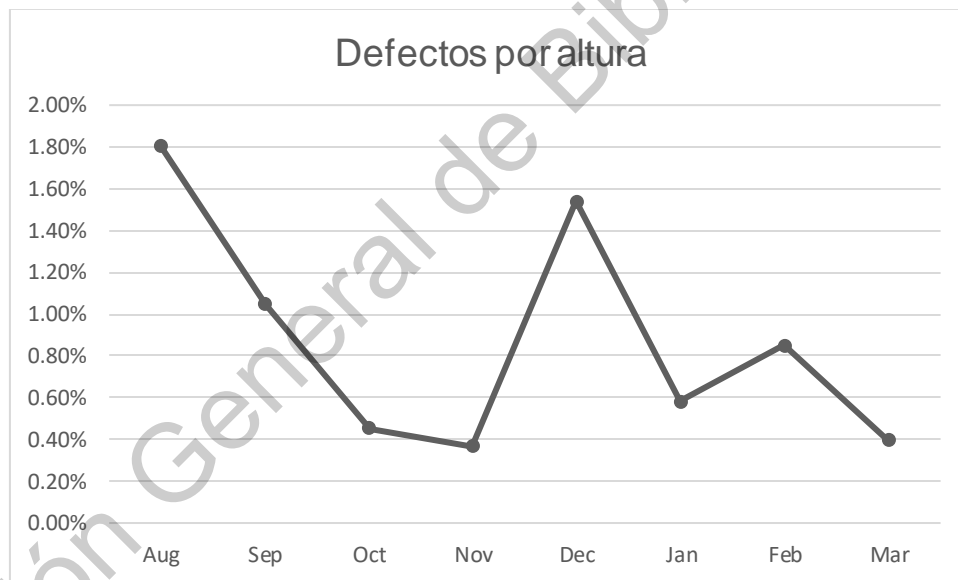


Figura 16. Porcentaje de piezas defectuosas por altura producidas durante los meses de duración del proyecto.

El promedio de defectos mensual durante los meses anteriores se encontraba en el 0.95% con respecto a altura. En el mes de marzo el nivel de defectos se

registró en 0.39%. Comparado con el mes de febrero, se registró una disminución de defectos por altura del 55%.

Posteriormente se hizo una comparativa de la habilidad del proceso, comparando registros del mes de agosto, justo antes del inicio del proyecto, presentado en la tabla 5 y figura 10.

Tabla 5. Estadísticos para el contraste de los datos en los al inicio y etapa actual del proyecto (agosto 2019 – marzo 2020)

Estadísticos	Antes	Después	Delta
Media	64.714	63.924	-0.78989
Des. Std.	0.2383	0.15357	0.084729
Pp	1.12	1.74	0.62
Ppk	0.68	0.7	0.02
Z.Bench	2.04	2.11	0.07
% Fuera de especificación	2.06	1.75	-0.31
DPMO	20605	17537	-3068

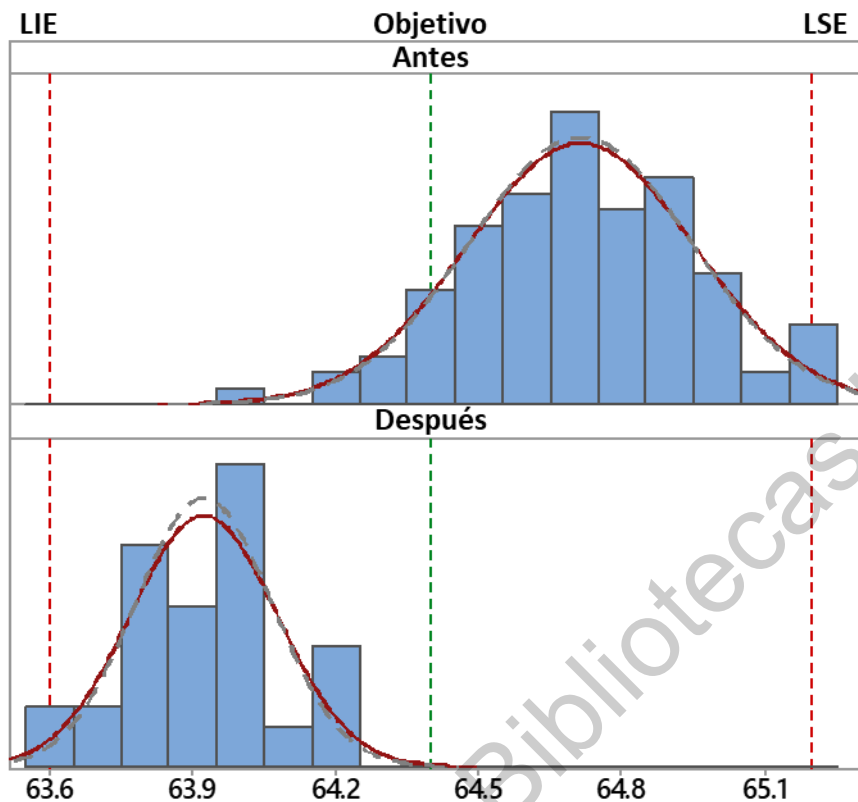


Figura 17. Comparativo de las habilidades de proceso (agosto 2019 – marzo 2020).

Los valores del comparativo en la figura 17 presentan una mejora tangible, sin embargo, lo más importante a denotar, es la orientación de la distribución que muestra una tendencia contraria a la anterior. La cual se encuentra cerca del límite de especificación inferior, que no supone rechazo por parte del cliente.

VI.3 Controlar

VI.3.1 Diseño de superficie de respuesta

El análisis de los factores que presentaron significancia estadística en la etapa de caracterización, son analizados a mayor profundidad en esta

etapa. Se propone analizar añadir un nivel al conformado de metal, un nivel central para analizar la superficie de respuesta de este factor. Debido a la importancia en la respuesta del proceso, se implementaron dos niveles en el factor MS. Estos niveles se analizan en el dominio del tiempo de curado del componente. Debido a que este impacta directamente a la dureza en el componente, y por consecuencia a la altura del ensamble. Se propone 4 y 5 minutos de curado. El nivel actual del proceso era 5 minutos. La disminución del tiempo de curado representa un cambio en la rigidez del componente. El propósito de esta etapa experimental es conocer la influencia que tiene el curado en la rigidez del componente MS, y por consecuencia el efecto que esta rigidez tiene directamente en el ensamble.

Es importante mencionar que la rigidez estática del ensamble es analizada mediante una prueba de laboratorio, que consiste en aplicar una fuerza en un extremo fijo del ensamble durante cierto recorrido.

Se propone un diseño factorial con 2 variables a 2 y 3 niveles y 3 réplicas de cada observación, presentado en la tabla 6:

- MS a dos niveles, 4 y 5 minutos de curado.
- Recorrido de conformado (2.192mm, 2.204mm y 2.215mm).

Tabla 6. Matriz para la optimización de proceso con 18 observaciones.

Obs.	MSpring	Altura	Blocks
1	0	-1	0.1
2	0	0	0.1
3	1	0	0.1
4	1	1	0.1
5	1	-1	0.1
6	0	1	0.1
7	0	-1	0.2
8	1	1	0.2
9	1	-1	0.2
10	0	0	0.2
11	0	1	0.2
12	1	0	0.2
13	1	1	0.3
14	0	1	0.3
15	1	-1	0.3
16	1	0	0.3
17	0	-1	0.3
18	0	0	0.3

Para evaluar el modelo óptimo obtenido de las experimentaciones es necesario llevar a cabo una etapa aprobación. Ejecutar una corrida de producción de ensamble con el análisis del 100% de las piezas, permitirá corroborar los resultados y evaluar la estandarización de los parámetros de los factores controlados en este proyecto. Los resultados serán analizados, y de ser positivos, serán aprobados por el departamento de ingeniería.

VI.3.2 Ejecución del experimento

Se llevó a cabo la experimentación prevista, con un total de 18 corridas experimentales. Esta experimentación da como resultado cuatro datos por corrida experimental. Debido a que la pieza a medir constituye un cilindro, la pieza es medida en su altura desde cuatro lados en el perímetro de la circunferencia. La experimentación dio un total de 76 datos.

VI.3.3 Análisis de varianza

Se obtuvieron los resultados de medición por parte del laboratorio de metrología, se realizó el análisis de la varianza considerando las dos variables manipuladas durante la experimentación, además de incluir la interacción entre estas.

Tabla 7. Resultados de la herramienta AOV del software R studio. Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1.

	Df	Sum Sq	Mean Sq_1	F value	Pr(>F)
MSpring	1	2.504	2.504	16.084	0.000153***
Altura	1	5.852	5.852	37.589	5.01E-08***
MSpring:Altura	1	0.901	0.901	5.784	0.018899 *
Residuals	68	10.587	0.156		

Los resultados de este análisis sugieren los factores MS y Altura de conformado de cuatro tienen significancia estadística en el proceso, esto, al presentar un valor P menor a 0.05. Cabe resaltar que en este análisis también presenta significancia la interacción entre ambos factores.

VI.3.4 Efectos principales

La gráfica de efectos principales presenta el comportamiento de la altura final del ensamble contra los niveles del MS y el recorrido de conformado

metálico de manera separada. El recorrido del conformado metálico es analizado en dos sectores diferentes donde se encuentra cada nivel de vulcanizado del MS.

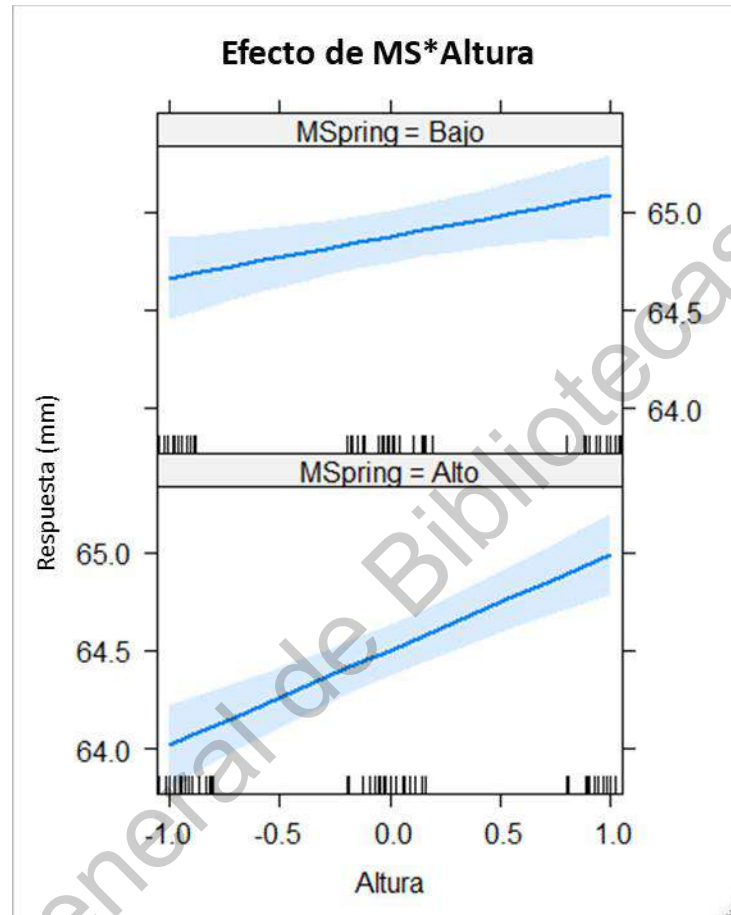


Figura 18. Gráfica de efectos principales para los factores MS y altura de conformado. Variable de respuesta en milímetros.

En la figura 17, es posible observar que el comportamiento del ensamble se ve afectado de manera importante por el nuevo nivel en la variable MS. Concretamente en la disminución del tiempo de vulcanizado. Se observa que, durante el nivel bajo de MS, los niveles de recorrido de conformado afectan de manera menos importante a la variable de respuesta,

además de situar a los datos de respuesta en niveles mayores fuera de los límites de especificación del cliente.

Es importante observar lo ocurrido con la variable de respuesta contra los límites de especificación del cliente.

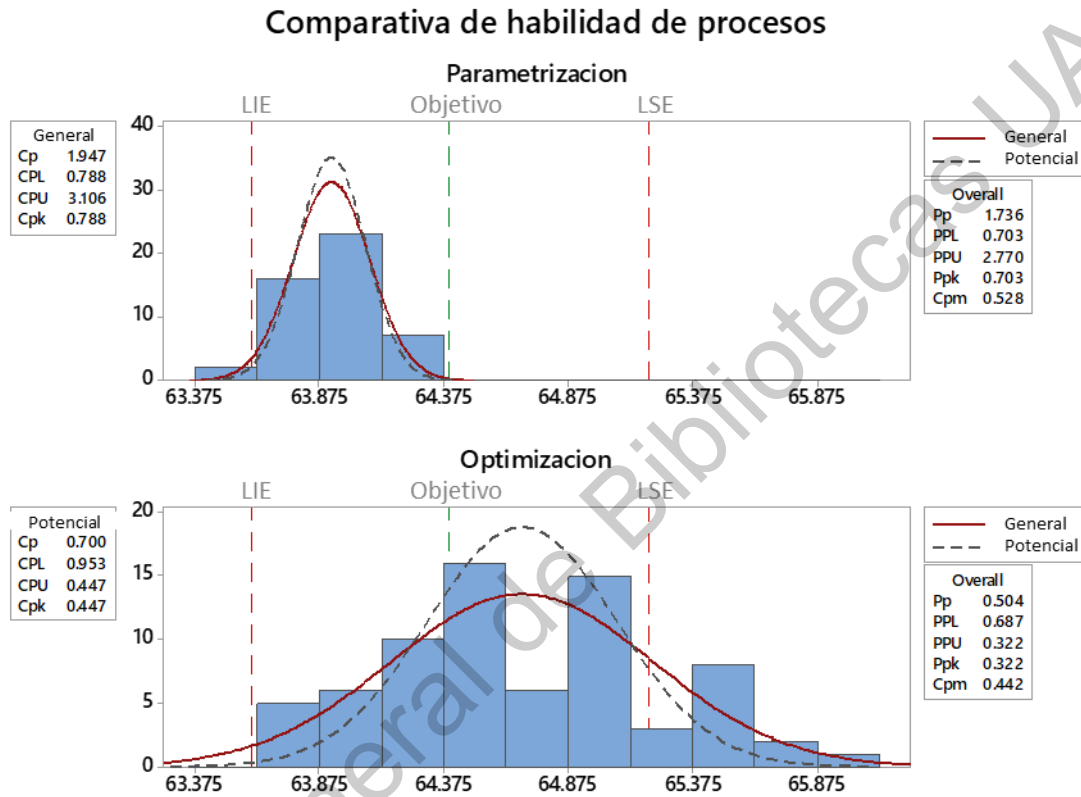


Figura 19. Comparativo de las habilidades de proceso (marzo 2020 – julio 2020).

Se presenta una comparativa del análisis de habilidad de proceso entre los resultados de la etapa de parametrización y los de optimización. Los índices de habilidad de proceso de la etapa de optimización son inferiores a los obtenidos en la etapa de caracterización. En adición, estos nuevos resultados presentan datos fuera del límite superior de especificación.

Aplicar el análisis de habilidad de proceso tiene como propósito mostrar de manera gráfica la ubicación y distribución de los resultados de la etapa de optimización, en comparativa con la etapa de parametrización.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

VII. CONCLUSIONES

Los factores elegidos para su estudio aportan en diferente nivel de variación al ensamble final. Si bien, los componentes **Housing** y **PC** aportan variación en alguna de las cavidades desde su inyección, no es suficiente para presentar significancia estadística en la altura final.

Los componentes **MS** y **Altura de conformado** presentan significancia estadística en el proceso. Los datos del análisis de varianza aplicado a los factores de significancia revelan que existe una estrecha interacción entre estos. La presencia del MS tiene una gran repercusión en el ensamble final mientras que la altura de formado se mantiene en el nivel alto. En el nivel bajo del conformado metálico el efecto del MS sobre el ensamble se ve notablemente disminuido. Esto sugiere que el nivel bajo de la *altura de conformado* mitiga el efecto de la presencia del MS en el ensamble.

Los resultados del diseño factorial preliminar mostraron, en primera instancia, la naturaleza del proceso. Aplicar el nivel bajo de conformado de metal en el proceso aportó resultados muy importantes en el proceso. Los datos sugieren que el nivel de conformado provocó que los datos se encontraran con tendencia al límite inferior de especificación. Disminuyendo de manera importante el número de defectos por altura (55%). Esto, incluso en el nivel más alto de producción en los últimos meses (109,752 piezas), presentando un porcentaje de defecto por altura de 0.39%.

Se presenta la necesidad de analizar en detalle el comportamiento de distintos niveles en la presencia del MS, evitando dejarlo fuera del ensamble. Así como seguir considerando la interacción entre estos nuevos niveles y la altura del conformado metálico.

El nuevo nivel de MS tiene que ver con un tiempo de curado menor, se esperaban resultados de rigidez menor, pero los datos sugieren lo contrario. Además de que el efecto del recorrido del conformado metálico se redujo de

manera importante (Considerando la magnitud del recorrido del crimpado ~0.2mm). Entonces estos resultados sugieren que, a menor curado, mayor rigidez, es necesario analizar más niveles de curado para recolectar más información acerca de la relación curado/rigidez.

Como resultado de este trabajo también se propone una matriz experimental mostrada en la tabla 8, para explorar el comportamiento del curado de mainspring para afectar su rigidez de manera conveniente para el ensamble. Este comprende las mismas dos variables (MS y altura de conformado). El cambio importante se encuentra en los niveles de tiempo de curado, estos se encuentran en en 0=5 minutos y 1=6 minutos.

Tabla 8. Matriz para la optimización de proceso con 18 observaciones.

Obs.	MSpring	Altura	Blocks
1	0	-1	0.1
2	0	0	0.1
3	1	0	0.1
4	1	1	0.1
5	1	-1	0.1
6	0	1	0.1
7	0	-1	0.2
8	1	1	0.2
9	1	-1	0.2
10	0	0	0.2
11	0	1	0.2
12	1	0	0.2
13	1	1	0.3
14	0	1	0.3
15	1	-1	0.3
16	1	0	0.3
17	0	-1	0.3
18	0	0	0.3

VIII. REFERENCIAS

- Apparao, K. C., & Birru, A. K. (2017). Optimization of Die casting process based on Taguchi approach. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 1852–1859. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.029>
- Biały, W. (2018). *Management Systems in Production Engineering BREAKDOWN CAUSE AND EFFECT ANALYSIS . CASE STUDY*. 2–6. <https://doi.org/10.1515/mspe>
- Dwivedi, S. P., Sharma, S., & Mishra, K. R. (2014). A356 Aluminum Alloy and applications- A Review. *International Journal of Advanced Materials Manufacturing & Characterization*, 4(2), 81–86. <https://doi.org/10.11127/ijammc.2014.08.01>
- Gehman, S. D. (1942). Rubber in vibration. *Journal of Applied Physics*, 13(6), 402–413. <https://doi.org/10.1063/1.1714885>
- Goos, P., & Leemans, H. (2004). Teaching optimal design of experiments using a spreadsheet. *Journal of Statistics Education*, 12(3). <https://doi.org/10.1080/10691898.2004.11910631>
- Hossen, J., Ahmad, N., & Ali, S. M. (2017). An application of Pareto analysis and cause-and- effect diagram (CED) to examine stoppage losses : a textile case from Bangladesh. *The Journal of The Textile Institute*, 5000(March), 0. <https://doi.org/10.1080/00405000.2017.1308786>
- Jaynes, J., Wong, W. K., & Xu, H. (2016). Using blocked fractional factorial designs to construct discrete choice experiments for healthcare studies. *Statistics in Medicine*, 35(15), 2543–2560. <https://doi.org/10.1002/sim.6882>
- Karuppusami, G., & Gandhinathan, R. (2006). Pareto analysis of critical

success factors of total quality management A literature review and analysis. *The TQM Magazine*, 18(4), 372–385. <https://doi.org/10.1108/09544780610671048>

Kwak, Y. H., & Anbari, F. T. (2006). Benefits, obstacles, and future of six sigma approach. *Technovation*, 26(5–6), 708–715. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2004.10.003>

Li, Y., Yue, Q., He, J., Zhao, F., & Wang, H. (2020). When will the arrival of China's secondary aluminum era? *Resources Policy*, 65(November 2019), 101573. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101573>

Lin, T. R., Farag, N. H., & Pan, J. (2005). Evaluation of frequency dependent rubber mount stiffness and damping by impact test. *Applied Acoustics*, 66(7), 829–844. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2004.10.004>

Marques, P. and Matthé, R. (2017). Six Sigma DMAIC project to improve the performance of an aluminum die casting operation in Portugal. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 34(2), 307–330.

Miyakawa, S. (1991). *UPPER SUPPORT FOR SHOCK ABSORBER IN SUSPENSION SYSTEM*. (19).

Nadeau, S., & Chapoux, Y. (2000). Application of the direct complex stiffness method to engine mounts. *Experimental Techniques*, 2–4.

Olivero, R. A., Nocerino, J. M., & Deming, S. N. (1995). Experimental Design and Optimization. *Handbook of Environmental Chemistry*, 2, 73–122. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-49148-4-3>

Peres, F. A. P., & Fogliatto, F. S. (2018). Variable selection methods in multivariate statistical process control: A systematic literature review. *Computers and Industrial Engineering*, 115(December 2017), 603–619. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.12.006>

- Pugna, A., Negrea, R., & Miclea, S. (2016). Using Six Sigma Methodology to Improve the Assembly Process in an Automotive Company. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 221(June), 308–316. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.120>
- Salmelin, R., & Parkkonen, L. (2010). Experimental Design. In *MEG: An Introduction to Methods: Vol. Second edi* (pp. 1–8). <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195307238.003.0004>
- Schulz, M., Application, F., Data, P., Examiner, P., & Culbreth, E. (2008). *SUSPENSIONSTRUT TOP MOUNT*. 2(12).
- Sobieszcanski-Sobieski, J., Kodiyalam, S., & Yang, R. Y. (2001). Optimization of car body under constraints of noise, vibration, and harshness (NVH), and crash. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 22(4), 295–306. <https://doi.org/10.1007/s00158-001-0150-6>
- Tan, Y. L., & Tan, C. L. (2018). Reducing scrap at a multinational toy manufacturer in Malaysia. *Global Business and Organizational Excellence*, 38(1), 32–40. <https://doi.org/10.1002/joe.21898>
- Wang, S. (2000). Design sensitivity analysis of noise, vibration, and harshness of vehicle body structure. *Shock and Vibration Digest*, 32(1), 61–62.
- Wheeler, A. B., & Braun, M. J. (2019). Package 'AlgDesign' NeedsCompilation yes. *CRAN*.
- Zhang, S. Y., Zhu, M., Li, Y., Jiang, J. Z., Ficca, R., Czechowicz, M., ... Herrmann, G. (2019). Ride comfort enhancement for passenger vehicles using the structure-immittance approach. *Vehicle System Dynamics*, 3114. <https://doi.org/10.1080/00423114.2019.1694158>

IX. ANEXOS

Dirección General de Bibliotecas UAQ